

Aktive Thermografie als zerstörungsfreie Prüfmethode bei Carbon Komponenten im Sportbereich

Volker CARL, Carl Messtechnik und Prüfsysteme, Dinslaken

Kurzfassung: Bei der Untersuchung von Carbonstrukturen im Fahrradbau kann die aktive Thermografie ergänzend bei der Ermittlung der Betriebsfestigkeit eingesetzt werden. Jedes Carbonenteil weist grundsätzlich aufgrund der manuellen Fertigung teilweise starke Materialinhomogenitäten auf, aber nicht jeder Fehler führt zum Bauteilversagen. Erst die Wechselwirkung von ungünstiger Fehlerposition und Kraftfluss kann zum Materialausfall führen. Daher ist es sinnvoll, beispielsweise die Steifigkeitswerte eines Rahmens aufzunehmen und diese zur Bewertung des Wärmeflussverhaltens mit hinzuzuziehen.

Einführung

Die aktive Thermografie wird seit ca. 10 Jahren im Bereich von Luft- und Raumfahrt zur zerstörungsfreien und bildgebenden Prüfung von anisotropen Leichtbaustrukturen und metallischen Triebwerksteilen erfolgreich eingesetzt. Das Prinzip des Prüfverfahren beruht dabei auf der Messung eines künstlich erzeugten Wärmeflusses in das Bauteil, der im Bereich von Fehlstellen gestört wird und auf der Probenoberfläche Reaktionen zeigt. Die Erzeugung des Wärmestroms aufgrund künstlich eingeleiteter Temperaturgradienten erfolgt beispielsweise durch Lichtimpulse, Langwellenstrahlung, Induktion, Konvektion und Ultraschall (Abb. 1). Jede Anregungsart charakterisiert unterschiedliche Fehlermechanismen wie z.B. Delaminationen und Risse sowie unterschiedliche Materialeigenschaften wie Dichte und Wärmeleitfähigkeit. Sinnvoll einsetzbar ist die Technik unabhängig vom Material bis zu einer Tiefe von 10mm.

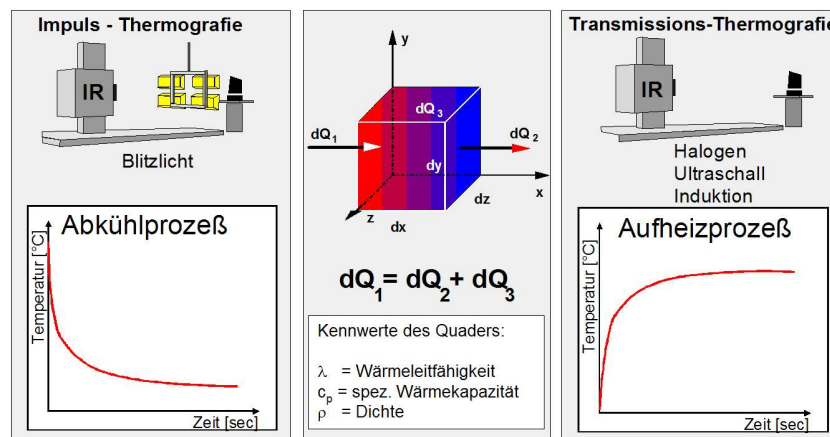


Abb. 1: Bei der aktiven Thermografie werden die Prüfteile thermisch angeregt. Der erzwungene Wärmefluss wird entweder in Reflexion oder Transmission als Funktion der Zeit gemessen.

Das erste Fahrrad bzw. Laufrad wurde ca. 1820 gebaut. Zwischen diesem Jahr und heute liegen knapp 200 Jahre und 30 Kg Gewichtsunterschied (Abb. 2). Wurden die ersten Räder überwiegend zum sonntäglichen Ausflug oder schlicht als Verkehrsmittel genutzt, setzt sich seit Jahren ein Trend zum Hochleistungssportgerät durch. Ziel dabei ist es, ein Fahrrad möglichst stabil und leicht zu gestalten, um im Rennen gegen die Zeit die letzten Hundertstel Sekunden herauszuschinden. So entwickelten sich im Laufe der Zeit Fahrräder, die zunächst aus Holz, dann aus Stahl und Aluminium und heute aus Carbonwerkstoff hergestellt werden.



Abb. 2: Das erste und das „letzte“ Fahrrad [1] [2]

Zeitgleich mit dieser Anforderung ist die mechanische Belastung eines Fahrrades enorm gestiegen. Fahrräder werden nicht mehr nur dazu genutzt, um von A nach B zu fahren, sondern auch, um von A nach B zu „fliegen“. Sind diese Unterschiede während der 200 jährigen Entwicklungszeit enorm, bleiben die Unterschiede für die Prüfung eines Fahrrades bescheiden, kurz gesagt: es gibt so gut wie keine.

Kräfte am Fahrrad

Die Mechanik am Fahrrad und alle auftretenden Berührungspunkte zwischen Mensch – Fahrrad und Boden, lassen sich durch Kraftvektoren an den Berührungspunkten darstellen. Eine genaue Erfassung der Kräfte gelingt entweder durch Berechnen und unter Annahme verschiedener Lastfälle oder experimentell unter realen Einsatzbedingungen. Dazu werden an den mechanisch hochbelasteten Stellen Dehnungsmessstreifen (DMS) aufgeklebt oder Beschleunigungsmesser mit Telemetriesystem appliziert (Abb. 3).



Abb. 3: Kraftangriffspunkte an einem Fahrrad und ihre experimentelle Erfassung [3]

Die Testfahrt wird unter extremen Bedingungen durchgeführt und per Messschrieb fortwährend protokolliert. Die resultierenden Kräfte können dann an den Angriffspunkten genau definiert werden und ein Rahmen diesbezüglich ausgelegt und konstruiert werden.

Notwendigkeit der Prüfung

Ein fertig montiertes Fahrrad wird nicht auf seine mechanische Festigkeit hin geprüft. Teilweise lassen Hersteller ihre (neuen) Produkte vom Prüflabor unter Berücksichtigung normaler Lastfälle auf die mechanische Festigkeit und Sicherheit hin prüfen. In regelmäßigen Abständen werden solche Studien beispielsweise auch von Verbraucherverbänden (Stiftung Warentest) in Auftrag gegeben. Tritt der Schadensfall u.U. auch mit Personenschaden ein, werden sowohl am schadhaften Bauteil als auch an neuen Bauteilen desselben Typs Vergleichsprüfungen durchgeführt um den Schadensmechanismus zu verstehen. In diesen Fällen erfolgt die Prüfung zu spät, da der Schaden bereits eingetreten ist. Viele Schäden hätten vermieden werden können, wenn vorher geprüft worden wäre.

Grundsätzlich unterschiedlich ist das Bauteilversagen bei Metall und CFK Materialien. Eine Überbeanspruchung führt bei Metallen meistens zunächst zu einer Verformung und kann im Extremfall über eine Rissbildung bis hin zum Bruch führen. Die Metallstruktur absorbiert dabei einen großen Teil der Stossenergie. CFK Material ist zwar hochfest, führt aber im Schadensfall oft zu einer direkten Zerstörung der Struktur ohne Vorankündigung und das an mehreren Stellen gleichzeitig (Abb. 4).



Abb. 4: Kraftabsorption und Bruch bei Aluminium Rahmen und CFK Rahmen [4]

Die Folge sind dann oft Stürze, entweder mit schwersten Verletzungen, oder sogar mit Todesfolge. Im Hinblick auf den Preis eines hochwertigen Carbon Fahrrades und der ständigen Versagensgefahr irgendeines Bauteiles aus CFK, stellt sich die Frage nach einer geeigneten Prüfmethode, die gleichzeitig schnell, sicher und kostengünstig ist.

Prüfung der mechanischen Kennwerte

Gängige Methoden zur Überprüfung der mechanischen Eigenschaften verschiedener Komponenten eines Fahrrades sind (Abb. 5):

Statische Steifigkeitstests

Die Komponente wird eingespannt und mit einer Kraft statisch belastet. Aus der Auslenkung infolge der Krafteinwirkung wird die (Feder) Steifigkeit berechnet. Die Steifigkeit eines Rahmens wird beispielsweise auch dazu genutzt, um den Fahrkomfort eines Fahrrades zu definieren. Da jede Carbon Komponente handgefertigt ist und Faserlagen theoretisch falsch gelegt oder sogar vergessen werden können, kann ein Steifigkeitswert auch eine ge-

wisse Aussagekräftigkeit diesbezüglich besitzen. Die wichtigsten Steifigkeiten am Rahmen werden durch die Spursteiligkeit und die Bremssteifigkeit beschrieben.

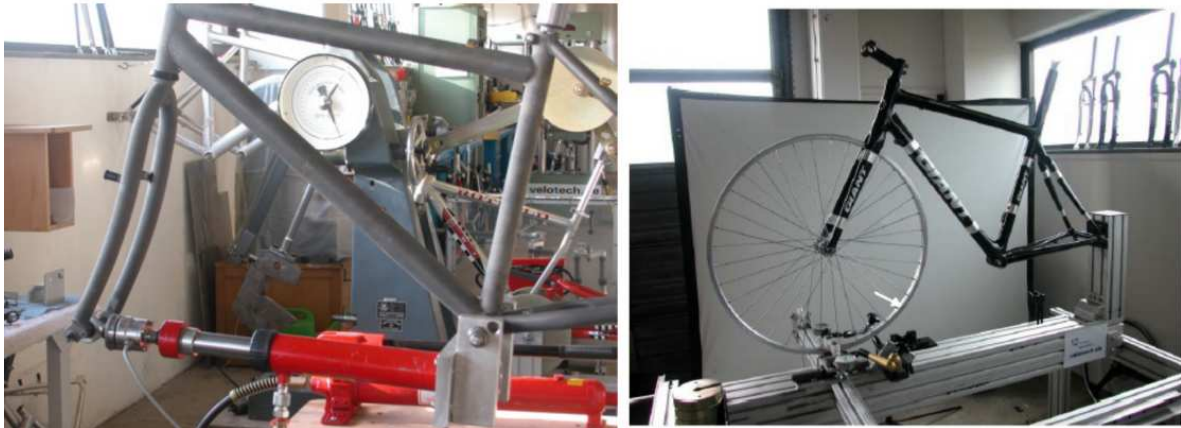


Abb. 5: Dynamische Belastungstests am Fahrradrahmen [5]

Dynamische Ermüdungstests

Um Lebensdaueraussagen treffen zu können, werden im Prüflabor dynamische Langzeittests durchgeführt. Dazu werden entweder einzelne Komponenten oder auch komplette Fahrräder mit Gewichten oder Kräften beschwert und beispielsweise auf einem Trommelprüfstand über Tage belastet. Haben sich nach der Testlaufzeit keine Schäden ergeben, so gilt der Fahrradtyp oder die Komponente als ausreichend sicher.

Maximallast-/ Überlasttests

Bei dieser Belastungsvariante wird einmalig ein hoher Kraftimpuls auf die Struktur aufgebracht, der von der Struktur ausgehalten werden muss. Übersteht die Komponente diesen Belastungsfall, gilt sie als sicher.

Bei all diesen Test wird das Bauteil unter Umständen zerstört und unterliegt zudem messtechnisch und herstellungsbedingt einer gewissen Streuung. Die Messwerte unterliegen weiterhin einem „integralen Wert“. Das heisst, die Lokalisierung einer möglichen Schädigung ist nicht möglich. Aus diesem Grund sollte eine schnelle und zerstörungsfreie Prüfmethode diese Unsicherheiten reduzieren.

Impuls Thermografie

Eine geeignete zerstörungsfreie Prüfung bietet die Impuls Thermografie. Bei diesem bildgebenden und schnellen Verfahren wird der Wärmefluss nach dem Einleiten eines Wärmeimpulses auf der Materialoberfläche in das Materialinnere gemessen. Unterschiede im Wärmefluss auf Grund von Materialfehlern und anderen Materialeigenschaften geben Aufschluss über das Gefahrenpotential einer CFK Komponente. Auf Grund der Handfertigung und des anisotropen Aufbau des Materials sind meist viele Auffälligkeiten im Auswertebild zu unterscheiden und zu bewerten. Aber nicht jeder Fehler führt zum Bauteilversagen oder zum Bauteilausschuss. Liegt der Fehler jedoch im Bereich einer mechanisch hochbelasteten Stelle und sind gleichzeitig auch die mechanischen Kennwerte (Steifigkeit) im Grenzbereich, so sollte eine Aussortierung erfolgen.

Nachfolgend wird die Technik an einer sicherheitsrelevanten CFK Komponente dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Vorderradgabel, die neben den beiden Carbonstreben auch einen Carbonschaft besitzt. Abgesehen davon, dass der Schaft stark auf Biegung belastet ist und CFK dafür eigentlich nicht geeignet ist, dürfen auf keinen Fall Wand-

dickensprünge (Kerbwirkung) oder gar Poren als Auslöser eines Risses vorhanden sein. Das Prüfergebn zeigt beides. Die Folge ist daher ein Bruch der Gabel im Bereich des Wanddickensprunges (Abb. 6). Für den Fahrer führte dies bedauerlicherweise zur Querschnittslähmung. Die Prüfung einer Gabel beträgt ca. 10 Minuten und hätte im Vorfeld zur Aussortierung dieser Gabel geführt.

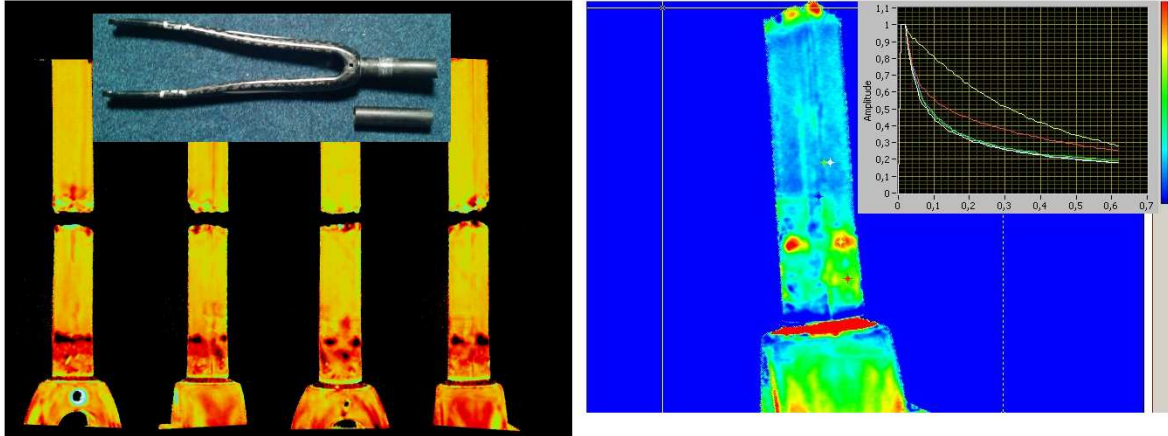


Abb. 6: Impuls Thermografische Untersuchung einer gebrochenen Gabel aus Carbon. Lunker und Wanddickensprünge führten zum Bruch [6]

Vergleichsmessung mit Computer Tomografie

Um die Ergebnisse der Impuls Thermografie abzusichern, ist dieses Bruchstück mit einer Computer Tomografie untersucht worden. Die Prüfung dauert ca. 30 Minuten, ebenso die Auswertung bzw. Sichtung der Daten. Die Ergebnisse der CT Untersuchung sind deutlich besser als die der Thermografie (Abb. 7), dafür liegen aber die Kosten um ein Vielfaches höher. Problematisch ist auch die Prüfung größerer Komponenten in einem CT.

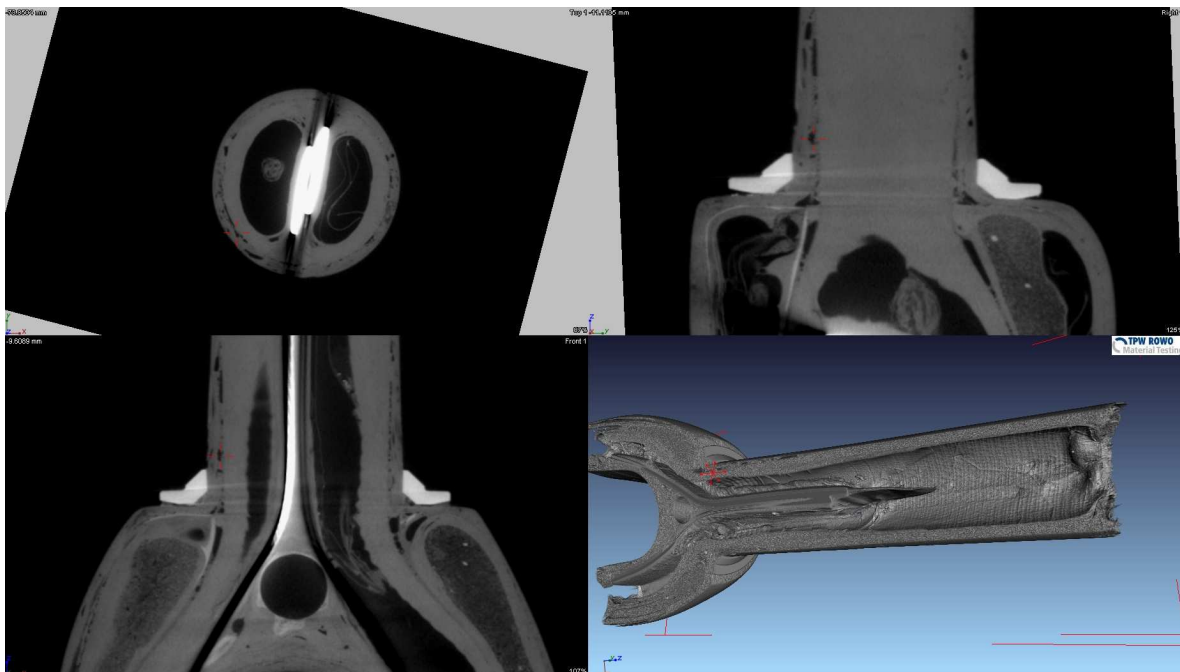


Abb. 7: Computer Tomografie mit hochauflösender Fehlerdarstellung am selben Bauteil [7]

Die CT Aufnahmen zeigen im Gegensatz zur Thermografie nicht nur die Auswirkungen der Fehler auf der Oberfläche, sondern alle Details im Inneren mit einer Auflösung von $5\mu\text{m}$. Der Werkstoff degeneriert teilweise zum Schwamm und konstruktive Mängel werden sofort deutlich. Trotz der hervorragenden Qualität gegenüber der Thermografie wird aber deutlich, das auch die Thermografie die „wichtigen“ Fehler detektieren kann: die großen Poren im unteren Schaft und im Bruchbereich, sowie den Wanddickenunterschied direkt im Bruchbereich. Das Ergebnis der Thermografie hätte ausgereicht, diesen schwerwiegenden Fehler aufzuspüren. Ein weiteres Merkmal der CT Untersuchung ist die Möglichkeit ein „normales“ Röntgen zu simulieren, indem nicht Schicht für Schicht dargestellt wird, sondern die komplette Durchsicht (Abb. 8).

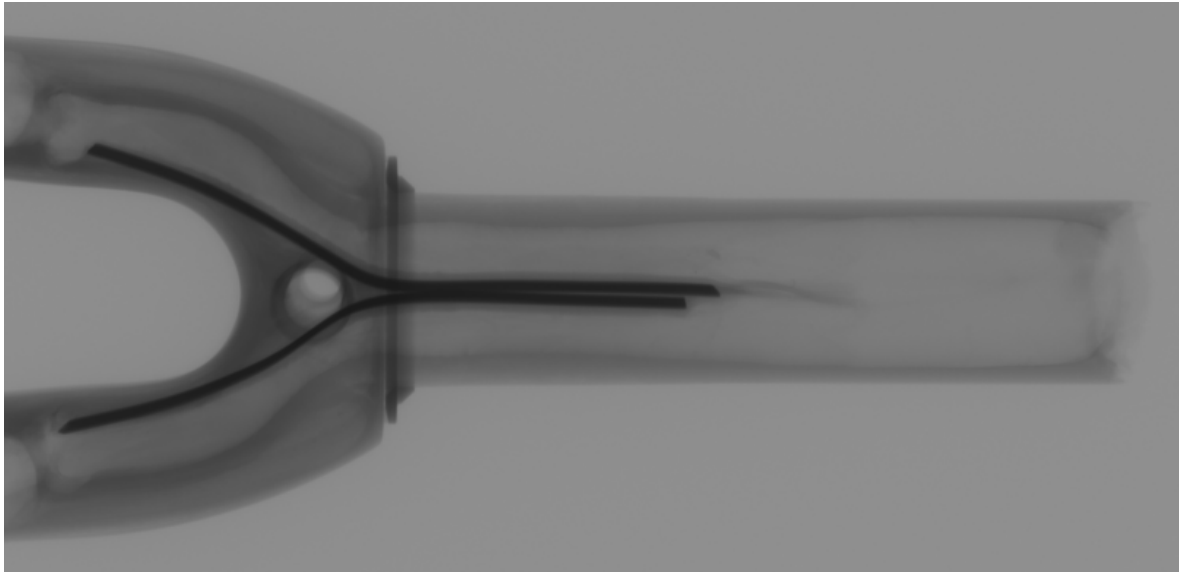


Abb. 8: Bei der herkömmliche Röntgendurchsicht können die Fehler, bis auf die der Wanddickenunterschiede, nicht beobachtet werden

In dieser Darstellungsart, die auch teilweise bei den Herstellern als Nachweis der Qualität benutzt wird, ist deutlich zu erkennen, dass die zuvor beschriebenen Fehler, bis auf die der Wanddickenunterschiede, nicht nachgewiesen werden können. Somit scheidet im Prinzip das herkömmliche Röntgenprinzip schlechter ab als die Thermografie.

Fazit

Auf Grund der hohen mechanischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen an ein CFK Fahrrad sollte die Herstellungsqualität mit geeigneten Prüfmethode nachgewiesen werden. Die Komplexität des Werkstoffes und die schwierige manuelle Verarbeitung führt bei zerstörungsfreien Prüfungen mit Impuls Thermografie zu einer Vielzahl von „Anzeigen“ in einem Auswertebild und gestaltet die Interpretation schwierig, da nicht jede Anzeige zum Ausfall des Werkstoffes führt. Die Kombination mit Messwerten statischer Tests führt dabei zu einer wesentlichen Vereinfachung des Sachverhaltes. Hochbelastete Komponenten und insbesondere biegebelastete CFK Komponenten sollten jedoch fehlerfrei sein, da ein Bruch hierbei schlagartig stattfindet und zu meist schweren Verletzungen führen kann. Ein Vergleich von Impuls Thermografie und CT Technologie zeigt, das auch die leistungsschwächere Thermografie hierzu in der Lage ist.

Referenzen

- [1], [2], [3],[4], [5], Firma Velotech GmbH, Schweinfurt, Auszüge aus Vorträgen
[6] Auswerteprotokoll Carl Messtechnik, Dinslaken, P014-07-09
[7] CT Aufnahmen der Firma TPW Rowo, Neuss